
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Modelování kotlů a jejich řízení

Modelling boilers and their regulation

Bakalářská práce

Autor:

Rostislav Lariš

Vedoucí práce:

Ing. Lukáš Hubka

Konzultant:

doc. Dr. Mgr. Ing. Jaroslav Hlava

V Liberci 12.5. 2008

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je seznámení se základními typy kotlů podle proudění pracovního média. Popis jejich základních důležitých parametrů a jejich základních regulačních okruhů. Dále seznámení se softwarovými nástroji programu Dymola pro simulaci dynamických jevů v objektově orientovaném jazyce Modelica. Ukázky jednoduchého příkladu k popsání programového prostředí Dymola. A na závěr sestavení modelu části kotle (přihříváku) v programu Dymola.

Klíčová slova : Bubnový kotel, průtočný kotel, regulace kotlů, Dymola, přihřívák páry.

Abstract

The first goal of this bachelory work is to make the acquaintance of basic boilers types according to streaming of the working medium. The second goal is to make a description of their basic important parameters and their basic regulation perimeters. The third goal is to make the acquaintance of software instruments of Dymola programme for simulation of dynamic effects in objectly orientated Modelica language. The next goal is to view a simple example to descript a programme's background of Dymola. And finaly, the last goal is to build the model of a boiler part (reheater) in Dymola programme.

Keywords : Drum boiler, flow boiler, regulation boilers, Dymola, reheater steam.

Předmluva

V první kapitole jsou uvedeny důležité parametry kotlů, jako jsou podkritický tlak, nadkritický tlak, popis a základní principy kotlů, způsob regulace jednotlivých typů kotle se stručným popisem druhu regulace.

V druhé kapitole je uveden úvod k programu Dymola, popis architektury programu, informace o jazyku Modelica a jeho využití a funkce v programu Dymola, ukázka v simulačním prostředí pro seznámení s programem a řešení diferenciálních rovnic v programu.

V třetí kapitole se zabýváme vybranou částí parního kotle přehříváku páry. Popisem a sestavením modelu přehříváku a simulací tohoto modelu v programu Dymola.

Především bych chtěl poděkovat panu Ing. Lukáši Hubkovi za poskytnuté rady a pomoc při vypracovávání práce a všem ostatním, kteří mi umožnili tuto práci vypracovat.

Doufám, že Vám tato práce usnadní orientaci mezi základními typy kotlů a případně pomůže při začátcích se simulačními prostředky v prostředí Dymola.

V Liberci 2.5.2008

Rostislav Lariš [ro.laris@seznam.cz]

Obsah

PŘEDMLUVA	5
OBSAH	6
ÚVOD	8
1 BUBNOVÉ A PRŮTOČNÉ KOTLE	10
1.1 TEPELNÁ ELEKTRÁRNA A VYUŽITÍ KOTLŮ	10
1.2 PARAMETRY KOTLŮ	11
1.2.1 Nadkritický a podkritický tlak.....	11
1.2.2 Průtočné kotle s nadkritickým tlakem.....	12
1.2.3 Bubnové kotle s podkritickým tlakem.....	14
1.3 POUŽITÍ V ENERGETICE	15
1.3.1 Světová energetika.....	15
1.3.2 Energetika ČR.....	16
1.4 REGULACE BUBNOVÝCH PARNÍCH KOTLŮ	17
1.4.1 Regulace parního výkonu	17
1.4.2 Regulace podtlaku v ohništi.....	18
1.4.3 Regulace spalovacího procesu.....	18
1.4.4 Regulace hladiny	18
1.4.5 Regulace teploty páry	18
1.5 REGULACE PRŮTOČNÝCH PARNÍCH KOTLŮ	19
1.5.1 Regulace tlaku	19
1.5.2 Regulace teploty páry	19
1.5.3 Regulace přípravy paliva.....	19
2 DYMOLA PROGRAM.....	21
2.1 CO JE DYMOLA	21
2.2 ARCHITEKTURA PROGRAMU.....	21
2.3 MODELICA JAZYK	22
2.4 PRÁCE S PROGRAMEM.....	22
2.5 ŘEŠENÍ DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC.....	24
2.5.1 Pomocí jazyka Modelica.....	24
2.5.2 Pomocí blokového schématu (Diagramu).....	27
2.5.3 Reakce na jednotkový skok na vstupu	28
2.6 NEVÝHODY	30
3 SIMULACE MODELU PŘIHRÍVÁKU.....	31
3.1 SEZNÁMENÍ S MODELOVOU SOUSTAVOU	31
3.2 MATEMATICKO FYZIKÁLNÍ POPIS	32
3.3 PŘEVEDENÍ A ÚPRAVA ROVNIC POMOCÍ PROGRAMU FLUIDPROP2.3.....	33
3.3.1 Převod p a $T_{out}(t)$ na entalpii $h_{out}(T_{out}(t))$	34
3.3.2 Převod p a $T_{out}(t)$ na hustotu $\rho_{out}(T_{out}(t))$	35
3.4 UPRAVENÉ ROVNICE PRO SIMULACI.....	36
3.5 SIMULACE UPRAVENÉHO MODELU PŘIHRÍVÁKU	37
3.5.1 Počáteční podmínky ($T_{out}=T_{Fe}$).....	37
3.5.2 Počáteční podmínky ($T_{out} < T_{Fe}$).....	38
ZÁVĚR	40
LITERATURA.....	41

Seznam obrázků

Obr.1.1: Princip tepelné elektrárny [3]	11
Obr.1.2: Princip průtočného kotle.....	13
Obr.1.3: Blokové uspořádání průtočného kotle [6]	13
Obr.1.3: Princip bubnového kotle.....	14
Obr.1.4: Blokové uspořádání bubnového kotle [6].....	15
Obr.1.5: Elektrárny v ČR [2]	16
Obr.2.1: Architektura Dymola [7]	22
Obr.2.2: Hlavní okno	23
Obr.2.3: Soustava sedačky.....	24
Obr.2.4: Nový model	25
Obr.2.5: Modelica Text.....	25
Obr.2.6: Kontrola modelu	26
Obr.2.7: Dráha sedačky	27
Obr.2.8: Schéma sedačky.....	28
Graf 1: Výchylka modelu sedačky.....	29
Obr.2.9: Blokové schéma.....	29
Obr.3.1: Trubka přehříváku	31
Obr.3.2: Řez trubkou	31
Tab.1: Entalpie a teplota	34
Graf 2: Entalpie a teplota	35
Tab.2: Hustota a teplota	35
Graf 3: Hustota a teplota	36
Graf 4: Teplota trubky a páry se stejnými počátečními podmínkami.....	38
Graf 5: Teplota trubky a páry se počátečními podmínkami $T_{Fe} > T_{out}$	39

Úvod

Ve třetí čtvrtině 20.století došlo ve světových energetických bilancích ke značným změnám v kvalitě a množství elektrické energie. Bylo řečeno v [1], že spotřeba všech druhů energie se zdvojnásobovala zhruba za 14 až 20 let. Spotřeba energie v roce 1950 byla $2,6 \cdot 10^9$ tmp (tun měrného paliva dále jen tmp), v roce 1966 byla $5,9 \cdot 10^9$ tmp a v roce 1970 se dostala na $7,2 \cdot 10^9$ tmp. V roce 1970 byla spotřeba rozložena na podíl ropy 46 % a zemního plynu 20 %. Podíl uhlí klesl během šedesátých let z 51 na 31 %. Asi 22 až 30 % celkové spotřeby energie je určeno pro výrobu elektrické energie. V zemích EHS v roce 1980 vzrůstá zájem o tuhá paliva pro výrobu energie. Podíl uhlí na 42 %, podíl ropy a zemního plynu poklesl od roku 1973 z 44,6 % na 32,7 % do roku 1980. Podíl jaderné energie se zvýšil z 5,5 na 12,6 % ve stejném období.

V ČSSR byl v letech 1955 až 1980 dosahován průměrný přírůstek spotřeby energetických zdrojů $12 \cdot 10^6$ tmp po pěti letech. V letech 1970 až 1975 byl téměř celý přírůstek spotřeby primárních energetických zdrojů kryt dovozem, hlavně kapalných paliv. V letech 1975 až 1980 byl přírůstek spotřeby energie kryt ze 2/3 dovozem (hlavně zemního plynu) a z 1/3 tuzemskými zdroji zvýšením těžby uhlí a jadernou energií. Při zvyšování těžby uhlí se postupem času stavěly v blízkosti uhelných dolů nové tepelné elektrárny. V dnešní době je v České republice většina výroby elektrické energie z elektráren tepelných 64 %, jaderných 29 %, vodní 3 %, plynové 3 % a ostatní 1 %.

Lidstvo dnes ve světě využívá pro výrobu energie fosilní paliva (uhlí 23 %, ropa 35 %, zemní plyn 21 %), uran 7 % a obnovitelné zdroje energie (voda 2 %, biomasa 11 %, ostatní 1 %). Tyto zdroje jsou pak spotřebovávány v elektroenergetice, teplárenství, dopravě, průmyslu, domácnostech a službách. Světová výroba elektrické energie je zajišťována z elektráren uhelných 39 %, plynových 18 %, jaderných 17 %, vodních 17 %, olejových 8 % a ostatních 1 %.

Uhlí je díky svým velkým zásobám a cenové dostupnosti i nadále hlavním zdrojem energie pro výrobce elektřiny na celém světě. Proto se neustále u tepelných elektráren klade větší důraz na zvyšování účinnosti tepelných elektráren spalujících uhlí a snížení emisí. Také technologie kotlů jsou stále u tepelných elektráren složitější, a aby tyto nové schopnosti bylo možno správně využít, musí s nimi držet krok zároveň vývoj v oblasti řízení.

I v dohledné budoucnosti se očekává, že spalování uhlí bude upřednostňováno i na dále, díky rozšiřování nových technologií, které nabízejí čistší a efektivnější provoz uhelných elektráren. Technologie nadkritických a ultra-nadkritických průtočných kotlů se vracejí na scénu, nové materiály i návrhy kotlů pomáhají dosahovat vyšších úrovní účinnosti a maximálně jednoduchého provozu.

Na zmiňované očekávání v budoucnosti byla založena tato práce, ve které se budeme především soustředit na typy kotlů ohledně proudění pracovního média (bubnový a průtočný kotel). Budeme se snažit popsat výhody a nevýhody jednotlivých typů kotlů k možnému vzájemnému porovnání. Budou zde uvedeny základní regulační okruhy jednotlivých typů parních kotlů.

V další části se budeme seznamovat se softwarovými nástroji simulačního programu Dymola. Seznámíme se s jazykem Modelica, který program Dymola využívá pro simulaci matematicko-fyzikálních rovnic modelů a soustav. V tomto jazyce se pokusíme nejdříve simulovat jednoduchý modelový příklad, který bude vést k názorné ukázce, jak pracovat s jazykem Modelica v programu Dymola. Dále se seznámíme s knihovnou Modelica, která obsahuje blokové prvky, ze kterých budeme skládat a simulovat stejný model jako pomocí jazyka Modelica.

V poslední části práce se budeme pokoušet o sestavení modelu vybrané části kotle (přihřívák), který se pokusíme simulovat v simulačním programu Dymola pomocí jazyka Modelica.

1 Bubnové a průtočné kotle

1.1 Tepelná elektrárna a využití kotlů

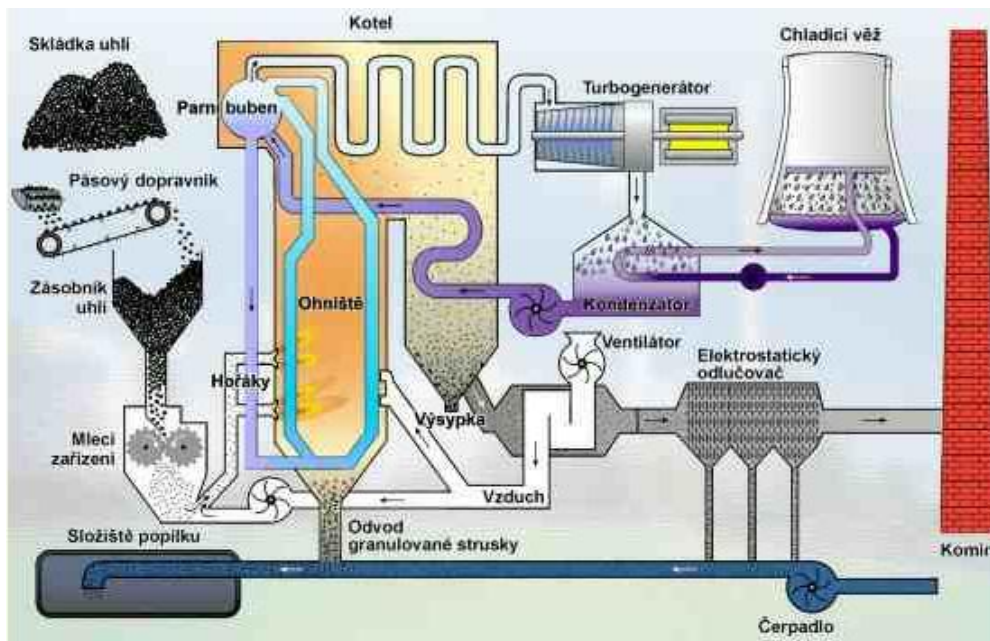
Základní princip fungování tepelné elektrárny je založen na přeměně energie tepelné na mechanickou a mechanické na elektrickou. Spalováním fosilního paliva (obvykle uhlí) se uvolňuje teplo, kterým se v parním kotli zahřívá voda a vzniká pára o vysoké teplotě a tlaku. Pára proudí na lopatky parní turbíny, lopatkám předá svou pohybovou energii a roztočí ji. Vzhledem k tomu, že je turbína pevně spojena s generátorem se tomuto soustrojí říká turbogenerátor nebo turboalternátor, roztáčí se i ten a přeměňuje mechanickou energii na elektickou energii. V elektrárenském generátoru rotuje magnet (elektromagnet), vinutí v němž se indukují napětí a proud, je umístěno na statoru okolo něj. Celé soustrojí se otáčí rychlostí okolo 3000 otáček za minutu. Pára se po průchodu turbínou odvádí do kondenzátoru, kde se chladí velkým množstvím chladicí vody. Zkapalněná pára se čerpadlem vhání zpátky do parního kotle a celý koloběh začíná znovu. Na Obr.1.1 je tento celý proces znázorněn.

Bylo řečeno v [9], že uhlí se do elektrárny dopravuje pásovými dopravníky (v případě hnědého uhlí většinou přímo z povrchových dolů v sousedství), popř. po železnici. Spotřeba uhlí závisí na jeho výhřevnosti (na jednu vyrobenou MWh se spálí asi 1 tuna uhlí). Po rozemletí na uhelný prášek a po jeho vysušení je pak palivo ventilátory spolu se vzduchem vháněno do hořáků kotle. Kromě roštových a práškových ohnišť se používají i moderní fluidní kotle různých typů. Jedním z nich jsou fluidní kotle se spalováním ve vznosu, tj. v cirkulujícím loži (jemně mleté uhlí se v proudě vzduchu chová jako vroucí kapalina). Hoření je zde velmi rychlé a snadno regulovatelné. Účinnost spalování dosahuje až 99 %, tepelná účinnost až 92 %.

Po shoření paliva padá část popela do spodního prostoru ohniště jako struska; ta se dopravuje na úložiště odpadu - na odkaliště. Část popela, která je v podobě jemných částic unášena ve spalínách, se zachycuje v elektroodlučovačích. Prakticky ve všech českých tepelných elektrárnách spalujících uhlí je instalováno i zařízení, které ze spalín odděluje oxidy síry a dusíku.

Kromě elektrárny vyrábějící pouze elektrickou energii (tzv. kondenzační elektrárna), jsou dnes běžně v provozu i elektrárny, ve kterých probíhá kombinovaná výroba elektřiny a tepla. K výrobě elektřiny se nevyužívá veškerá dostupná energie

Tepelná elektrárna se skládá z několika výrobních bloků. Každý výrobní blok znamená jednu samostatnou jednotku skládající se z kotle, navazující turbíny, generátoru, odlučovače popílku, chladicí věže a blokového transformátoru. V chladicích věžích se proudem vzduchu ochlazuje chladicí voda, která v kondenzátoru ochlazovala páru a tím byla zahřána.



1.2 Parametry kotlů

1.2.1 Nadkritický a podkritický tlak

11

dělí na bloky nadkritické s tlakem páry 24 – 25 MPa a teplotou 540 – 560 °C a na ultrakritické s tlakem 25 – 31,5 MPa a teplotou 580 – 650 °C.

Podkritický tlak je tlak, který je menší než hodnota kritického bodu 22,1 MPa. Podkritické tlaky jsou používány především pro bubnové kotle (viz kapitola 1.2.3). Kde se tlaky pohybují okolo 12,41 – 17,23 MPa (1800 – 2500 psi).

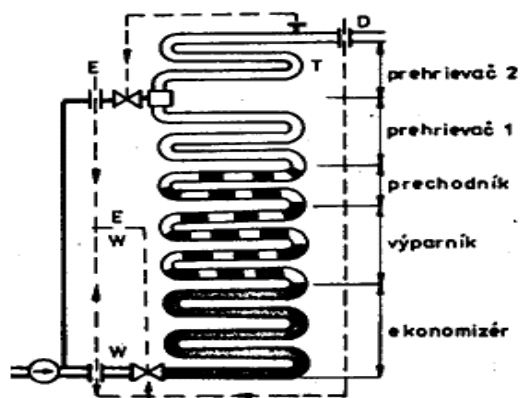
1.2.2 Průtočné kotle s nadkritickým tlakem

Bylo uvedeno v [6], že první nadkritické technologie s průtočnými kotli se objevily v 50. letech 20. století, ale neuspěly, nebyly spolehlivé a velmi špatně se ovládaly. K dalším problémům docházelo při údržbě a při vyšších teplotách selhával použitý materiál. Proto se musely používat drahé vysoce legované materiály, které rovněž s porovnáním nízkých cen paliv neobstály. Dalším důvodem neúspěchu bylo, že průtočné kotle musely nepřetržitě pracovat v nadkritickém režimu s tlakem kolem 27,58 MPa (4000 psi), třeba i při malém odběru. To vedlo k plýtvání energie. Proto se vývoj průtočných kotlů s nadkritickým tlakem na čas odmlčel.

Vývoj nových materiálů v metalurgii při výrobě pevnějších kotlových trubek v 80. letech, dal znovu do pohybu vývoj nadkritické technologie, a také díky vylepšené konstrukci kotlů, je i dnes vývoj nadkritických technologií ve výrobě elektrické energie jeden z nejčastěji řešených problémů.

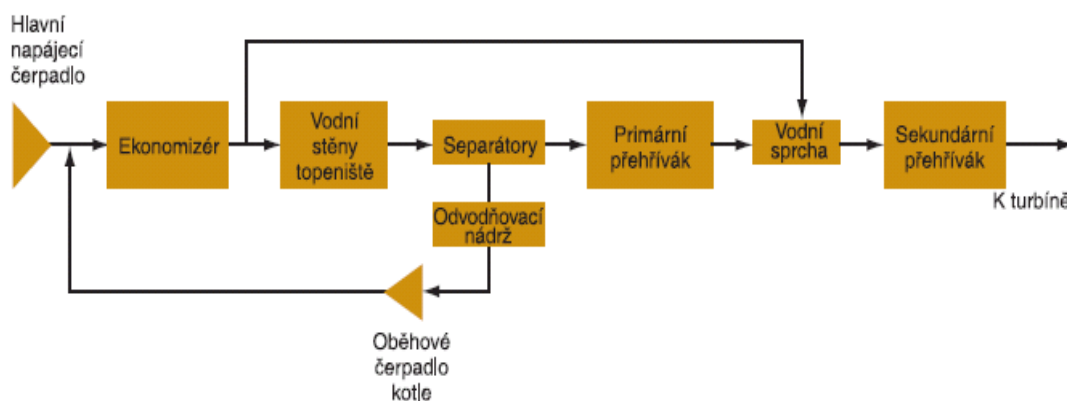
U průtočných kotlů Obr.1.2 je nejvíce kladen důraz na přesnost a rozlišovací schopnost řídicího systému. Liší se od bubnových kotlů tím, že nemají velký parní buben, který slouží jako místo, kde je uložena část energie. Průtočné kotle nemají tedy žádnou zásobu energie, a proto musí řídicí systém přesně a nepřetržitě hlídat tok napájecí vody a rychlost hoření v kotli, aby byl schopen nepřetržitě dodávat dodávky páry na požadavky turbíny, která umožňuje generátoru dosahovat požadovaného výkonu.

V případě rychlých změn dodávek páry na lopatky parní turbíny požadované generátorem u průtočného kotle, ztrácí řídicí systém na přesnosti a rozlišovací schopnosti, což je u těchto průtočných kotlů nežádoucí. Ztráty zároveň snižují účinnost nadkritických bloků. Z tohoto faktu plyne, že jen při ustáleném provozu bude zajištěna schopnost řídicího systému kontrolovat celý provoz co nejpřesněji a tím je i zajištěna vysoká účinnost nadkritické jednotky.



Obr.1.2: Princip průtočného kotle

Na Obr.1.3 je znázorněn průběh pracovního média průtočným kotlem, kde napájecí čerpadlo přivede do prostoru kotle vodu, která je dopravena do ekonomizéru, který je složen z trubkovitých hadů, jimiž protéká ohříváná voda. Ekonomizér je zavěšen v tahu kotle a je ohříván proudícími spalinami. Má za úkol předehřát napájecí vodu. Část napájecí vody se mění na páru na stěnách topeniště. Tato směs vody a páry je vedena na separátory, které oddělují páru od napájecí vody. Napájecí voda je svedena do odvodňovací nádrže a čerpadlem hnána zpět do ekonomizéru. Oddělená pára ze separátorů je přehřátá pomocí tepelných výměníků (přehříváků páry), které využívají tepla spalin k ohřevu páry na pracovní teplotu. Přehřívák páry je složen z trubkovitých hadů. Z venku na trubky přehříváku působí horké spaliny, které ohřívají proudící páru která je uvnitř trubek. Přehřívák je většinou složen z několika sekcí.



Obr.1.3: Blokové uspořádání průtočného kotle [6]

S rostoucími tlaky páry ale podstatně stoupají materiálové nároky na samotné zařízení a také požadavky na úpravu vody pro tato zařízení. Proto tyto velké uhelné

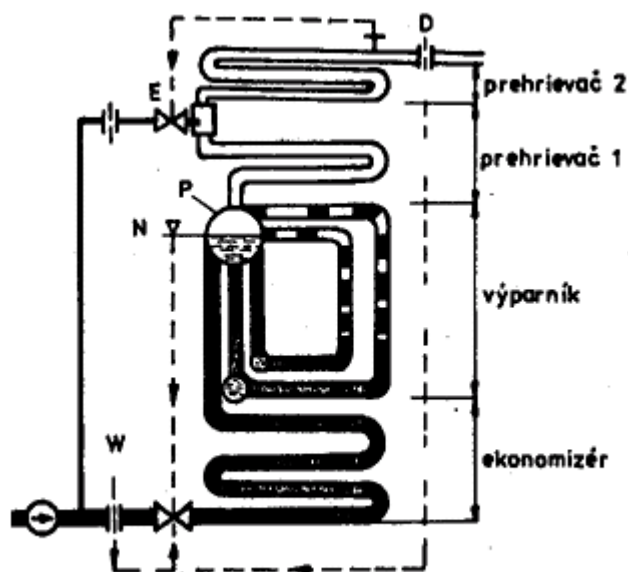
elektrárny používají kotle s nejvyššími pracovními tlaky. To s sebou nese i použití velmi drahých a kvalitních materiálů na stavbu kotlů i parogenerátorů, jejichž použití se vyplatí až při vysokých výkonech těchto zařízení.

Pro malá města nebo okrajové čtvrtě příliš vzdálené od tepláren se staví výtopy. Stavba turbíny za kotlem bývá často již ekonomicky neúnosná a pro samotné zásobování teplem pak stačí kotel s nízkým tlakem páry a také nižšími náklady na stavbu kotle i zařízení na úpravu napájecí vody, z těchto důvodů je výhodnější použít kotle s podkritickým tlakem.

1.2.3 Bubnové kotle s podkritickým tlakem

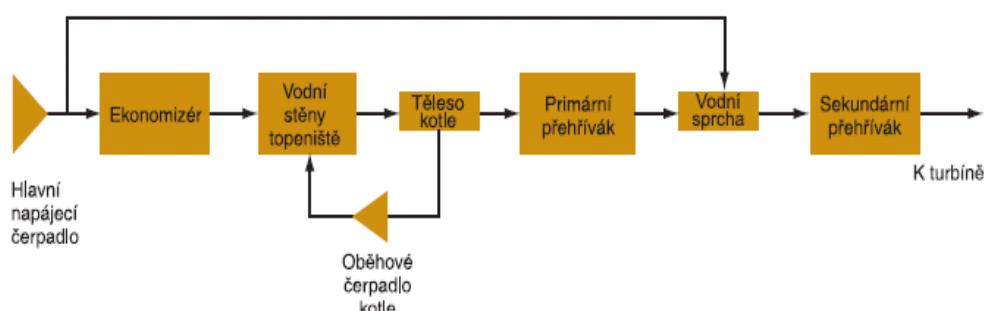
První neúspěch a problémy zmiňované (viz kapitola 1.2.2) u nadkritických průtočných kotlů se v 70. letech 20.století zaměřily především na energetiku s využitím bubnových kotlů s podkritickým tlakem. Těmto kotlům se říká bubnové, protože mají velký parní buben, ve kterém se voda mění na páru.

Velký parní buben u bubnových kotlů Obr.1.3 slouží jako zásoba energie. Díky této tzv. zásobě energie nemusí řídicí systém přesně a nepřetržitě přizpůsobit tok napájecí vody a rychlost hoření v kotli. Tyto druhy podkritických kotlů jsou výhodné při častých změnách požadovaných generátorem. Voda se u těchto bubnových podkritických kotlů mění v parním bubnu, což vede k pomalejšímu náběhu a také k pomalejším reakcím na změnu zátěže. Díky změnám zátěže a nízkým tlakům než u průtočných kotlů dosahují tyto jednotky účinnosti jen okolo 30 – 38 %.



Obr.1.3: Princip bubnového kotle

Na Obr.1.4 je znázorněn průběh pracovního média bubnovým kotlem, který se liší oproti průtočnému kotli (viz kapitola 1.2.2) tím, že voda se mění na páru v bubnu kotle. U bubnových kotlů je napájecí voda ohřátá a protlačována trubkami spalínového ohříváku vody (ekonomizér) do bubnu. Z bubnu je voda vyvedena do zavodňovacích kolektorů výparníku, prochází výparníkem na stěnách ohniště, kde dochází k vývinu páry. Vzniklá směs vody a páry je zavedena zpět do bubnu, tam se oddělí od sebe voda a pára. Pára pokračuje do přehříváků, kde se zvyšuje její teplota. Tato přehřátá pára se dále vede na lopatky turbíny. Voda se vrací zpět do výparníku (tzv. přirozená cirkulace) a pára pokračuje do přehříváků, kde se zvyšuje její teplota. Tato přehřátá pára se dále vede na lopatky turbíny.



Obr.1.4: Blokové uspořádání bubnového kotle [6]

1.3 Použití v energetice

1.3.1 Světová energetika

Vyšší spalovací tlaky a teploty způsobují vyšší účinnost, která zvyšuje také množství energie vzniklé z daného množství spotřebovaného uhlí. Proto se v současné době velcí světový výrobci energie zajímají a soustředí především na nadkritický provoz elektráren. S těmito nadkritickými elektrárnami lze dosáhnout vyšší účinnosti a tím zároveň snížit náklady na palivo. Dalším důvodem je, že při vyšší účinnosti spalování zároveň snížíme emise vzniklé při spalování. Přibližně se dá říct, že každé procento navíc dosažené na účinnosti, sníží emise plynů o dvě až tři procenta. V dnešní době dosahují nadkritické jednotky účinnosti nad 45 %, kdežto u podkritických elektráren se účinnost pohybuje okolo 30 – 38 %. Nesmíme však opomenout, nevýhody provozu nadkritických elektráren zmiňované viz kapitola 1.2.2.

Většina nadkritických jednotek je postavena v Asii, především v Číně. Tyto nové uhelné elektrárny poskytují potřebnou infrastrukturu, která umožňuje a přináší elektrický proud do oblastí a míst země, která dosud nebyla připojena do rozvodné sítě. Dalším hlavním úkolem těchto nových elektráren je podpora rychle rostoucí ekonomiky.

1.3.2 Energetika ČR

Na Obr.1.5 je možno vidět elektrárny, které zásobují energií ČR. V našem případě se budeme soustředit pouze na elektrárny tepelné.



Obr.1.5: Elektrárny v ČR [2]

V České republice se používají převážně tři druhy kotlů průtočné, bubnové a fluidní kotle. Největší výkon těchto tepelných elektráren zastupují průtočné kotle zhruba okolo 4500 MW. Bubnové kotle mají výkonové zastoupení kolem 1100 MW a nejméně zastoupené jsou fluidní kotle s výkonem okolo 300 MW.

Za zmínku stojí především největší blok s výkonem 500 MW průtočný kotel K1600 v Mělníku (EMĚ III.). Bylo řečeno v [5], že Kotel K 1600 je jediným energetickým zdrojem bloku K 11 (EMĚ III). Jedná se o parní kotel s přehřívákem a mezipřehřívákem páry, který má superponovanou cirkulaci oběhovými čerpadly. Kotel je věžového provedení s granulačním ohništěm a s přímým foukáním uhelného prášku. Mlýnské okruhy (10 ks) mají obrátový celosvařovaný třídič, přímé foukání uhelného prášku s práškovými hořáky umístěnými po obvodu spalovací komory. Pod práškovými hořáky je umístěno 10 automatických stabilizačních a zapalovacích

mazutových hořáků. Regulační výkonový rozsah bloku se dosahuje provozem 7 až 9 mlýnských okruhů. Kotel je vybavený na sací straně dvěma vzduchovými ventilátory. Na výtlačné straně je ventilátor připojen na vzduchovod vedený k parnímu ohříváku vzduchu. Dále je kotel vybavený čtyřmi kouřovými ventilátory. Ventilátory jsou napojeny přímo za elektrostatickými odlučovači. Struska je odváděna prostřednictvím výsypky pod spalovací komorou. Kotel K 1600 dosahuje následujících technických parametrů: jmenovité množství vyrobené páry 1 600 t/h, minimální množství vyrobené páry s ohledem na stabilitu proudění vody 480 t/h, jmenovitý přetlak VT 17,45 MPa, jmenovitý přetlak na výstupu z kotle ST 4,3 MPa, jmenovitá teplota páry VT / ST 540 ± 8 °C, tepelná účinnost 88,1 %.

1.4 Regulace bubnových parních kotlů

Parní kotel patří mezi víceparametrové regulované soustavy se složitou strukturou vnitřních vazeb. K tomu, aby byla zajištěna co nejlepší regulace takové soustavy se používají víceparametrové regulační obvody, které využívají podmínek autonomnosti a invariantnosti. Bylo řečeno v [1], že regulace kotle musí především zajistit :

- Dodržení předepsaných tolerancí v kvalitě páry (tlak, teplota, čistota páry)
- Provoz z maximální účinností (synchronizace přívodu paliva a spalovacího vzduchu)
- Udržení požadovaného výkonu kotle
- Bezpečný provoz kotle (udržování hladiny v bubnu, podtlak v ohništi atd.)
- Správnou a bezpečnou funkci přípravy paliva.

Nejčastější poruchové veličiny v provozu kotle jsou : změna výhřevnosti paliva, i jiné vlastnosti paliva, množství odebírané páry z kotle, kotle napájecí vody, zanesení výhřevných ploch.

1.4.1 Regulace parního výkonu

Má za úkol zajistit rychlé přizpůsobení výkonu kotle na spotřebu páry, která je dodávána na lopatky turbíny. Hlavní regulovanou veličinou je tlak páry na výstupu z kotle. Změny výkonu kotle se mění pomocí změny množství paliva. Akční veličina v tomto případě je hmotnostní tok paliva.

U plyných a kapalných paliv se nevyskytují poruchy v přívodu paliv, proto se u těchto kotlů využívá jednoduchých regulačních obvodů.

1.4.2 Regulace podtlaku v ohništi

Regulace v ohništi udržuje rovnováhu mezi odvodem spalin vznikajících spalováním a přívodem vzduchu. Z tohoto důvodu by se měl obvod spalin ovládat od stejného signálu jako přívod vzduchu. Odvod spalin se však reguluje podle podtlaku v ohništi. Nejčastěji se využívají jednoduché regulátory typu PI nebo P.

1.4.3 Regulace spalovacího procesu

Regulace spalovacího procesu se nejjednodušeji reguluje udržováním stálého poměru mezi přívodem paliva a spalovacího vzduchu. Správným přívodem vzduchu lze dosáhnout konstantní výhřevnosti paliva. Tato podmínka není většinou splněna, proto se připojuje k obvodu regulace nelineární funkční měnič, který mění poměr množství paliva a vzduchu závislých na výkonu kotle. Většinou se používají regulátory typu PI. Akční členy paliva a spalovacího vzduchu je ovládán P.

1.4.4 Regulace hladiny

Regulace hladiny má za úkol udržet výšku hladiny v bubnu na předepsané výši. Používá se regulátor typu P. Výhody tohoto regulátoru jsou jednoduchost provedení a dobrá stabilita regulace. Nevýhoda je tvrdá regulační odchylka a to, že na začátku regulačního pochodu dochází k velkým výkyvům v dodávce napájecí vody.

1.4.5 Regulace teploty páry

Regulace teploty přehřáté páry udržuje teplotu páry na výstupu z kotle v mezích ($\pm 5\%$ °C). Akční veličina na straně páry :

- Chlazením v povrchových chladičích
- Chlazením vstřikem vody (vstřík napájecí vody nebo vlastního kondenzátoru)

Akční veličina na straně spalin:

- Obtokem části přehříváku spalin
- Naklápěním hořáků
- Recirkulací spalin

V ČR se používá převážně regulace na straně páry. Při této regulaci může být pára chlazená před posledním dílem přehříváku a nebo ve více stupních. Pro jednoduché případy se používají regulátory typu PI a PID, ale často nestačí ani regulátor PID a proto se používá rozvětvených obvodů s měřením poruchové veličiny.

1.5 Regulace průtočných parních kotlů

Regulační obvody a způsob regulace výkonu ohledně regulace tlaku páry a množství paliva jsou podobné regulaci výkonu bubnových kotlů (viz kapitola 1.2). Nejčastější poruchy průtočných kotlů jsou množství odebírané páry turbínou a požadovaný výkon bloku. Pro zlepšení dynamických vlastností se používají rozvětvené jednoparametrové regulační obvody s měřením vybrané poruchové veličiny (parní výkon, teplota spalin na výstupu z ohniště apod.).

1.5.1 Regulace tlaku

Hlavní regulovanou veličinou je u průtočných kotlů výstupní tlak páry na výstupu kotle. Průtočné kotle mají na rozdíl od bubnových těsněji vázané některé regulační obvody. Napájecí obvody a přívod paliva jsou ovlivňovány s poměrně velkým zesílením oproti bubnovým kotlům.

1.5.2 Regulace teploty páry

Regulace teploty páry se liší od regulace od bubnových kotlů. Většinou se používá jako akční veličina vstřík společně s některou z akčních veličin na straně spalin. Teplotním čidlem je změřená skutečná teplota a je srovnána s požadovanou hodnotou. Odchylují se skutečná teplota od požadované teploty, tak je tato odchylka korigována řídicí technikou. Do média je vstřikováno více či méně studené vody, aby se dosáhlo požadované teploty.

Nejvyšší přesnost regulace výstupní teploty páry je požadována právě u elektrárenských kotlů, protože regulace teploty páry musí udržovat teplotu na výstupu z kotle ve velmi úzkých mezích.

1.5.3 Regulace přípravy paliva

Regulace přípravy paliva se dělí podle :

- Přímé foukání prášku do ohniště
- Mlecí okruh se zásobníkem prášku
- Centrální mlýnice

Při přímém foukání prášku do ohniště je provoz kotle závislý na provozu mlýnů, a proto je vždy spojen s regulací výkonu kotle (tlaku páry). U mlecího okruhu je v zásobníku prášku namletý prášek předem tak, že provoz kotle není ovlivněn provozem mlýnice a proto regulaci mlýnice je možno řešit samostatně od regulace kotle. To je výhodné, protože velikost mlecí práce je tak velká, že není efektivní omezovat výkony mlecích mlýnů podle spotřeby prášku. Efektivnější způsob je přerušovaný provoz s velkým výkonem a ukládáním prášku do zásobníku. Při přímém foukání prášku a i při použití zásobníku prášku ovlivňuje kotel provoz mlýnice tím, že pro vysoušení se využívá vzduch nebo spaliny z kotle. Z regulačních obvodů kotle představuje mlýn článek regulované soustavy s největším zpožděním. Proto nelze použít jednoduchých regulačních obvodů, ale obvod se rozvětjuje měřením poruch (změna výhřevnosti a další).

2 Dymola program

2.1 Co je Dymola

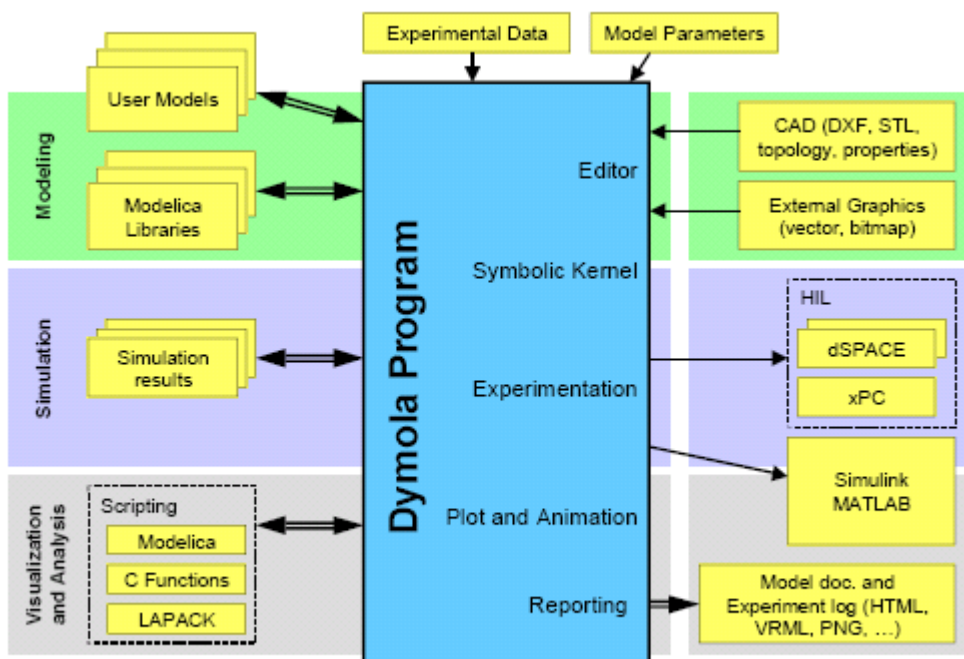
Program *Dymola* od *Dynasim AB* je program pro dynamické modelování různých experimentů a pokusů. Je vhodný pro modelování různých druhů fyzikálních systémů. Podporuje hierarchické složení modelu, knihovna znovu použitelných komponent, konektory a jiné. Modelové knihovny jsou užitečné v mnoha inženýrských oblastech.

Dymola využívá nových modelových metod pro simulování dynamických modelů a soustav, založených na popisových rovnicích a na objektové orientaci. Další vlastnosti Dymoly jsou:

- Překlad do C, závislost na překladači
- Výstupní formát je kompatibilní s programem MatLab
- Snadné skládání modelů z komponent
- Snadno rozšiřitelná o nové knihovny a o vlastní uživatelské komponenty
- Symbolické řešení některých rovnic, redukuje náročnost numerického modelu
- 3D Animace
- Simulace v reálném čase
- Umí pracovat s rozsáhlými, komplikovanými inženýrskými modely
- Otevřené rozhraní pro jiné programy

2.2 Architektura programu

Architektura programu je zobrazena na Obr.2.1 Dymola využívá pro skládání modelů schopný grafický editor. Celý program je založen na využití předdefinovaných modelů a komponent z knihovny Modelica uložených v evidenci, které jsou definovány pomocí jazyka *Modelica* (viz kapitola 2.3). Dymola může přijmout jiné data a grafické soubory. Obsahuje symbolický překladač *Modelica rovnic* generované C-kódem pro simulaci. Poskytuje automatický generátor dokumentace.



Obr.2.1: Architektura Dymola [7]

2.3 Modelica Jazyk

Modelování a simulace se stává stále důležitější v různých inženýrských oblastech, které potřebují stále více analyzovat soustavy složené z různých komponent z odlišných oblastí. Například pro modelování mechanických systémů v automobilech, u kosmických aplikací a dalších. Takové systémy jsou většinou složeny z elektrických, mechanických a hydraulických podsystémů, které můžeme pomocí jazyka Modelica vytvářet a skládat v jeden úplný systém.

Modelica je objektově orientovaný simulační jazyk vyvíjený od roku 1996 pro modelování velkých, složitých a různorodých systémů. Tento jazyk vznikl nezávisle na programu *Dymola* neziskovou organizací *Modelica Association* (www.modelica.org). Tento jazyk umí pracovat s diferenciálními, algebraickými a diskrétními rovnicemi. Existuje standardní knihovna komponent, kterou je možnost rozšiřovat o další knihovny a vlastní komponenty. Standardní knihovna je volně dostupná na stránkách organizace. Modelica je vhodná pro rozsáhlý obor modelování.

2.4 Práce s programem

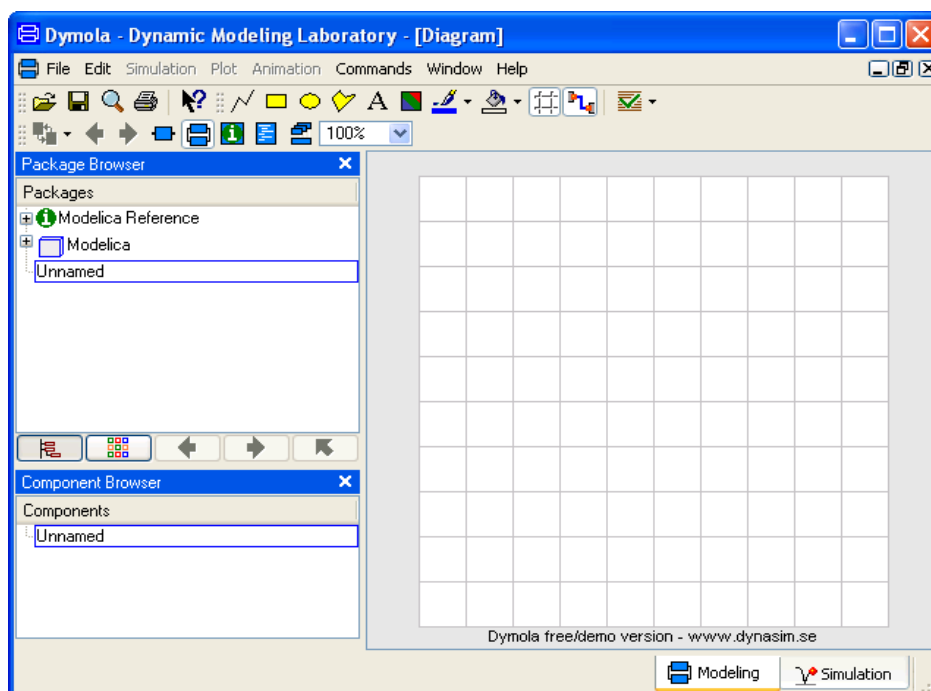
Tato kapitola má za úkol přes jednoduchý příklad seznámit uživatele se základními prvky programu *Dymola*. Pro přesnější informace o programu *Dymola* může uživatel také využít on-line dokumentace a uživatelský manuál. On-line dokumentace je

zároveň dostupná v programu v menu help, v záložce *Documentation*. V menu help, jako další velmi pomocný prvek, se nachází záložka *What's This*. Po výběru této záložky můžeme v programu pod hlavním menu kliknout na cokoliv. Za účelem získání bližších a stručných informací, například o neznámé ikoně pod hlavním menu. Po výběru daného prvku se nám zobrazí ve žlutém textovém poli stručné informace a popis prvku.

Při startu programu Dymola se spustí okno programu Dymola, které využívá dvou režimů:

- Modeling – pro nalezení, prohledávání a skládání modelů a modelových komponent.
- Simulation – pro vytváření experimentu s modely a vyhodnocování výsledků.

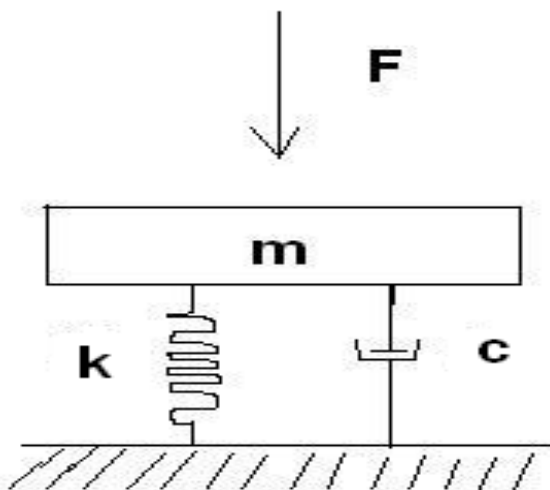
Přepínání těchto dvou režimů je možné vpravo dole na Obr.2.2. Dymola při spuštění začíná vždy ve standardním nastavení, které si může uživatel změnit a přednastavit podle svých vlastních potřeb a využití.



Obr.2.2: Hlavní okno

2.5 Řešení diferenciálních rovnic

Vybraný jednoduchý příklad ukáže jak pracovat v programu Dymola s diferenciálními rovnicemi. Jako ukázkový model byl zvolen : *Sedačka s tlumičem a pružinou.*



Obr.2.3: Soustava sedačky

Na sedačku Obr.2.3, na kterou působí ze shora síla F , hmotnost sedačky je označená jako m , tuhost pružiny k , u tlumiče c a tíhovou sílu F_g jsou zvoleny parametry : $F=5000\cos(t)$ N, $k=2000$ N/m, $m=2$ kg, $c = 5$ kg/s. Vytvoříme matematicko-fyzikální popis (1). a dosadíme do něj naše zvolené hodnoty. Tím získáme diferenciální rovnici druhého řádu (2).

$$-F - kx - cx' - F_g = mx'' \quad (1)$$

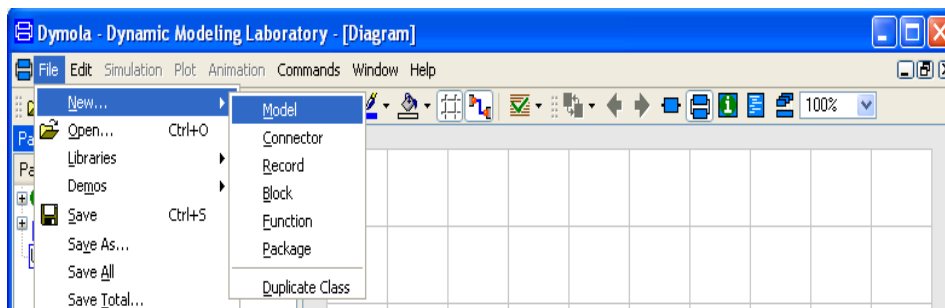
$$\begin{aligned} x'' &= -\frac{F \cos(t)}{m} - \frac{kx}{m} - \frac{cx'}{m} - g \\ x'' &= -\frac{5000 \cos(t)}{2} - \frac{2000x}{2} - \frac{5x'}{2} - 9,81 \\ x'' &= -2500 \cos(t) - 1000x - 2,5x' - 9,81 \end{aligned} \quad (2)$$

2.5.1 Pomocí jazyka Modelica

Spustíme si program Dymola. Pokud je program už puštěný a je v něm něco rozdělaného. Dáme v hlavním menu okna Dymoly *File/ Clar all*, tím se dostaneme do

výchozího nastavení programu. Jako by byl znovu spuštěn. Musíme si dát pozor na uložení předešlé práce.

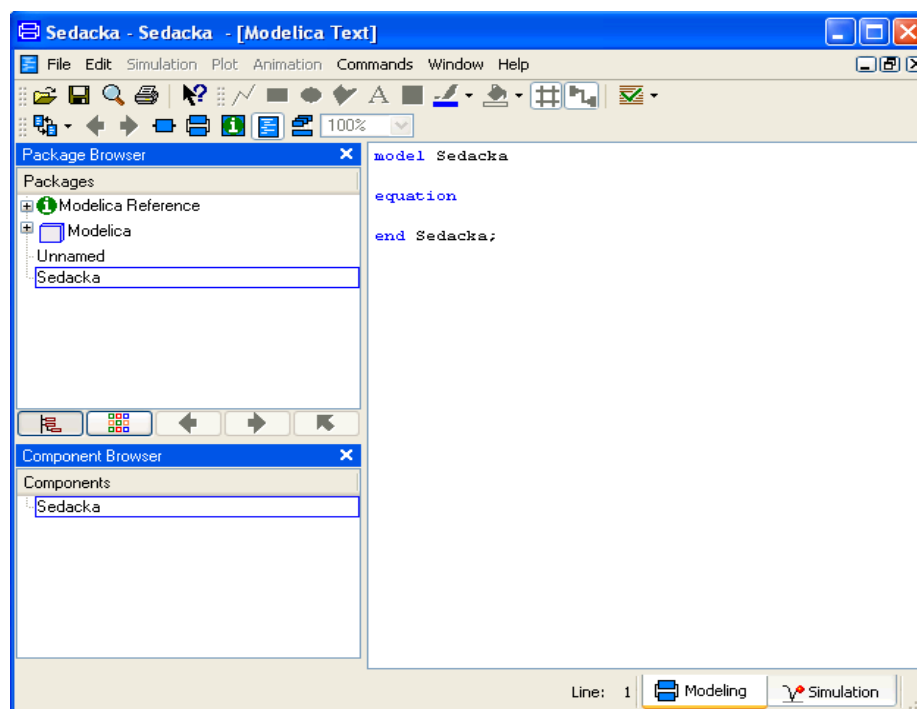
Po spuštění programu musíme pro další práci vytvořit nový model *File/new/model*.



Obr.2.4: Nový model

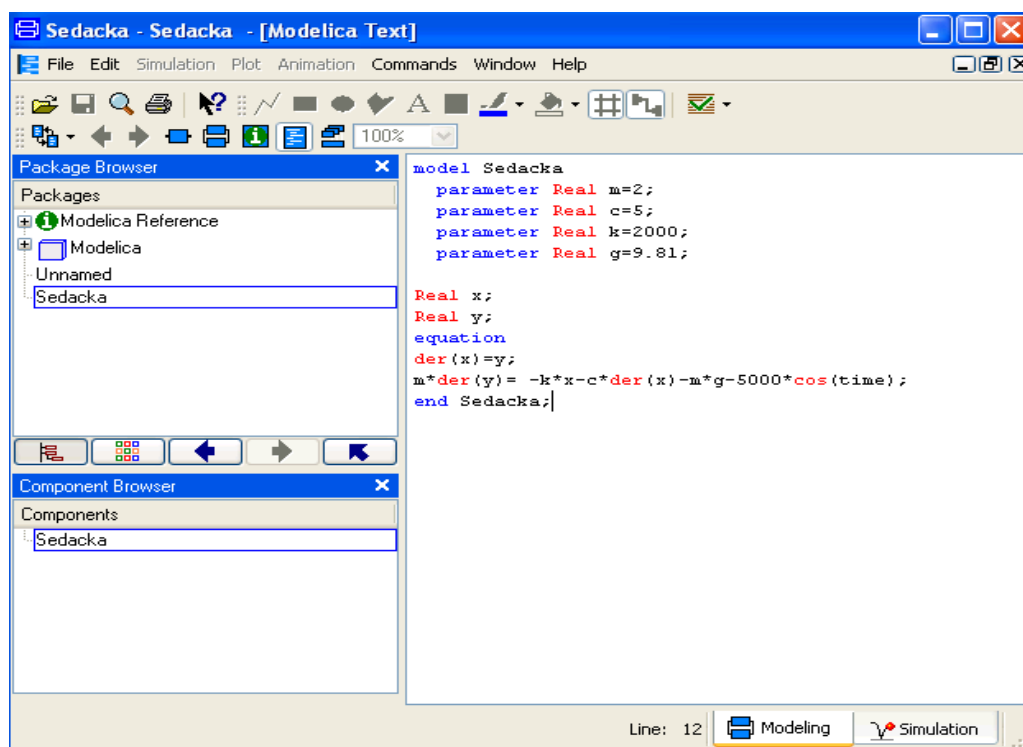
Po stisknutí *model* na Obr.2.4, se nám objeví další okno (Create new model), kde vyplníme název modelu (*Sedacka*) a potvrdíme tlačítkem OK. Dále potvrdíme tlačítkem Accept vytvoření nového modelu.

Na liště s ikonami pod hlavním menu stiskneme ikonu *Modelica Text* a měli bychom se dostat do stavu, který je zobrazen na Obr.2.5.



Obr.2.5: Modelica Text

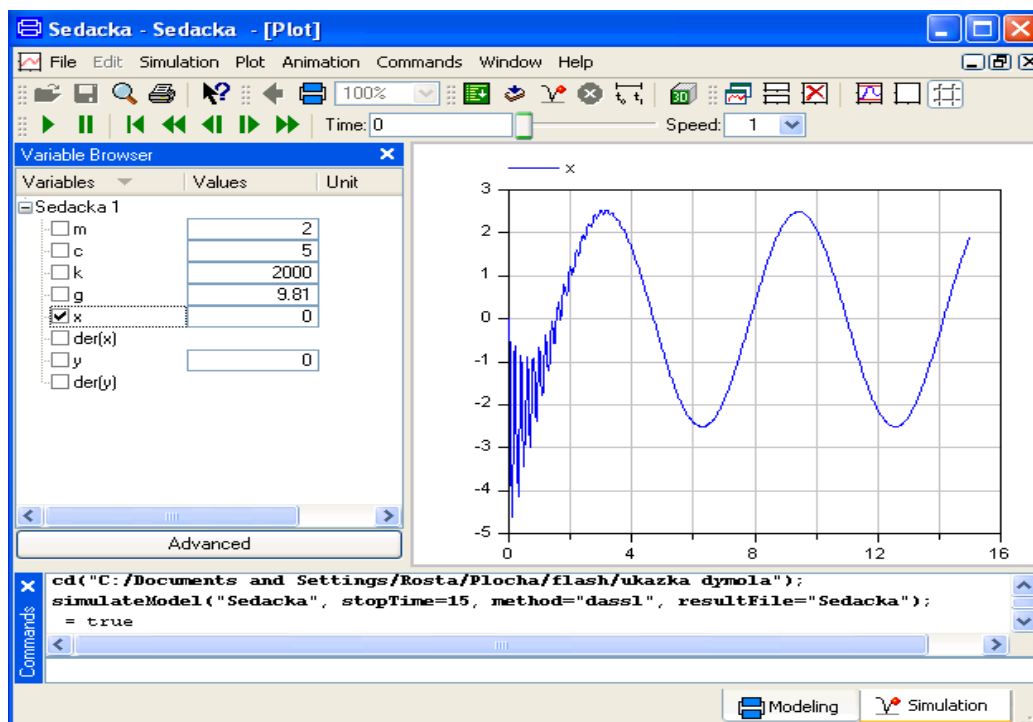
Pod *model Sedacka* vypíšeme parametry konstant m , c , k , g s jejich hodnotami. Pod nadefinované konstanty si nadefinujeme dvě reálné proměnné x, y a pod *equation* vepíšeme rovnice. Poté stiskneme pravé tlačítko myši v programovém okně a vybereme *Highlight syntax*. Text by nám měl projít syntaxní kontrolou a měl by se zbarvit stejně jako na Obr.2.6, pokud je bez chyb.



Obr.2.6: Kontrola modelu

Po úspěšném přeložení se přepneme vpravo dole do režimu simulace pomocí tlačítka *Simulation*. V režimu simulace se nám v hlavním menu odemknou záložky *simulation*, *plot* a *animation*. Otevřeme záložku *simulation/setup* a nastavíme si dobu simulace na 15 s pomocí *start time=0* a *stop time=15* v našem případě. V tom samém menu po nastavení doby simulace stiskneme tlačítko *Simulate*. Po zaškrtnutí parametru x se nám objeví graficky dráha sedačky Obr.2.7. Obě dvě záložky *Simulate* a *setup* jsou zobrazeny i pod hlavním menu jako ikony.

Obrovskou výhodou vidím v levém okně *Variable browser* na Obr.2.7, protože v něm můžeme rychle upravovat a měnit konstanty podle potřeb, například změnit hmotnost sedačky m a po stisku ikony *Simulate*, se nám hned zobrazí upravený výsledek v grafickém poli s novou zadanou hmotností sedačky m .



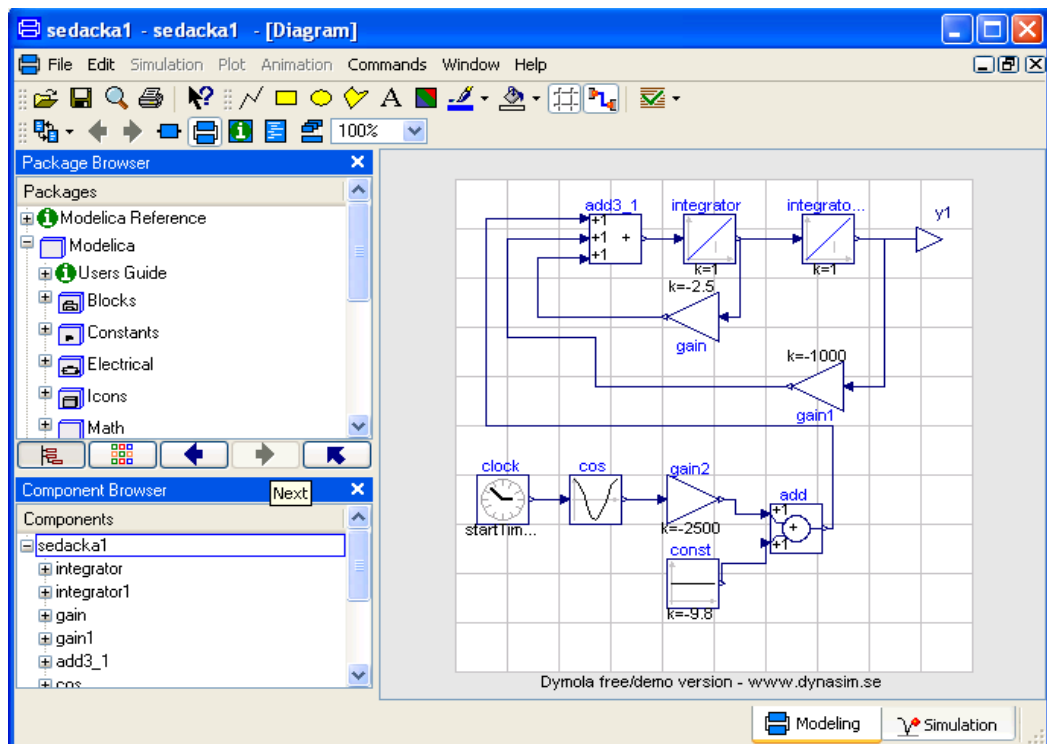
Obr.2.7: Dráha sedačky

2.5.2 Pomocí blokového schématu (Diagramu)

Spustíme si program Dymola a vytvoříme nový model (viz kapitola 2.4.1). Na liště s ikonami pod hlavním menu nestiskneme ikonu *Modelica Text*, ale měli bychom mít aktivní ikonu *Diagram*. Na Obr.2.8 v levém okně *Package Browser* v knihovně Modelica, kterou otevřeme dvojím klikem tlačítkem levé myši. V *Blocks* se nacházejí základní blokové prvky pro tvorbu diferenciálních rovnic, které jsme použili, pro vytvoření schématu diferenciální rovnice sedačky. Tyto blokové prvky se přenášejí z panelu *Package Browser* pomocí myši na plochu Diagramu. Jediný prvek, který se nenachází v knihovně *Blocks* je *y1* (výstup), což se rovná x v rovnici (1) a (2). Ten vytvoříme pomocí stisku *pravého tlačítka myši/ Create connector* na konci spoje s integrátorem.

Po úspěšném dokončení blokového schématu se přepneme vpravo dole do režimu simulace pomocí tlačítka *Simulation* a dále pokračujeme v simulaci (viz kapitola 2.4.1).

Na konec si po proběhnutí simulace zobrazíme *y1* (výstup), který bude graficky odpovídat Obr.2.7.



Obr.2.8: Schéma sedačky

2.5.3 Reakce na jednotkový skok na vstupu

V tomto případě simulace využijeme parametry (viz kapitola 2.5). Změníme sílu na $F=1000\text{ N}$. Výsledný tvar upravené diferenciální rovnice z tvaru (2) je zobrazen ve tvaru (9).

$$x'' + 2,5x' + 1000x = -500u(t) - 9,81 \quad (9)$$

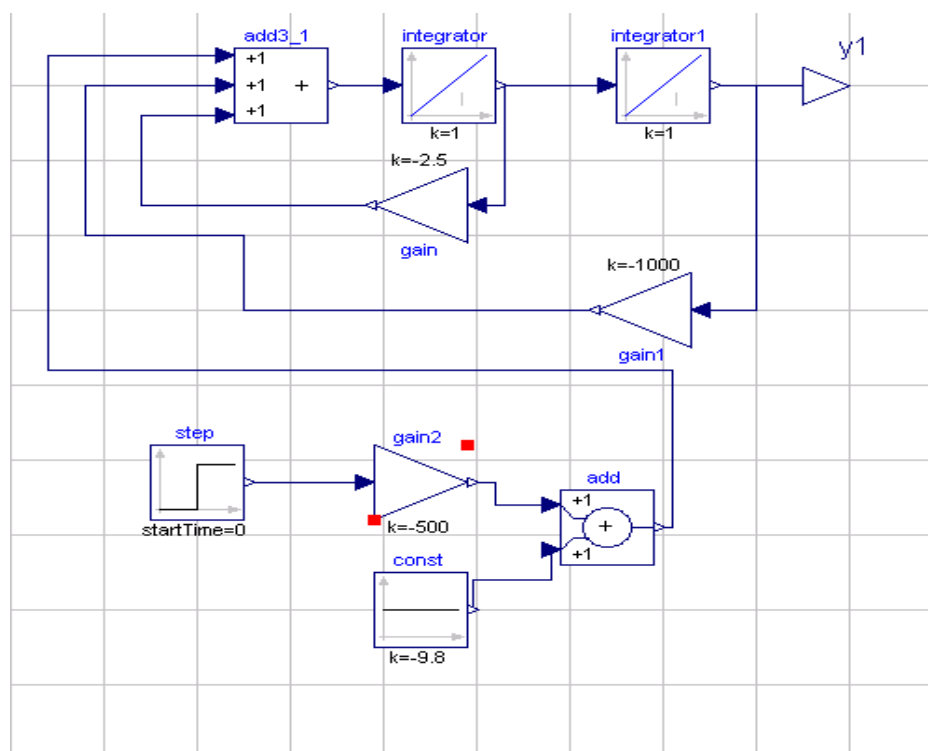
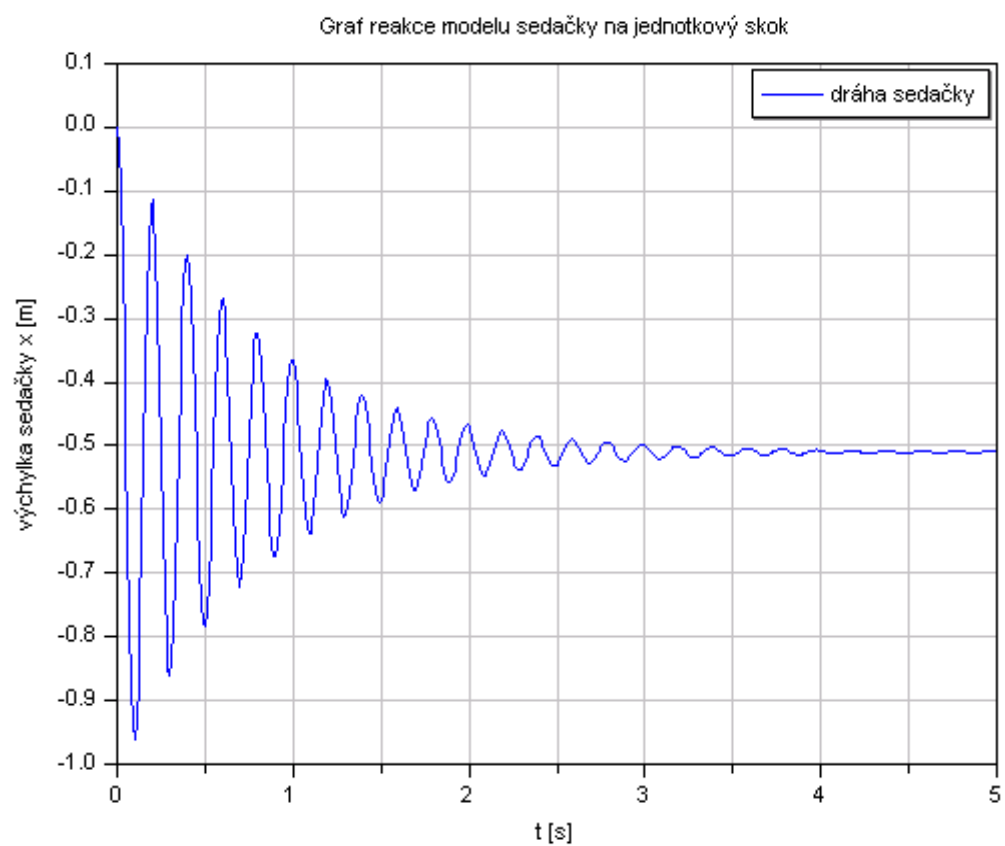
```

model skokoveprog
  parameter Real m=2;
  parameter Real c=5;
  parameter Real k=2000;
  parameter Real g=9.81;

  Real x;
  Real y;

  equation
    der(x)=y;
    m*der(y)= -k*x-c*der(x)-m*g-1000;
  end skokoveprog;

```



Obr.2.9: Blokové schéma

Na Graf 1 je možno vidět výchylku průběhu modelu na jednotkový skos, kterého jsme dosáhli pomocí simulace blokového schématu v diagramu Obr.2.9 a zároveň pomocí jazyka Modelica v části Modelica Text.

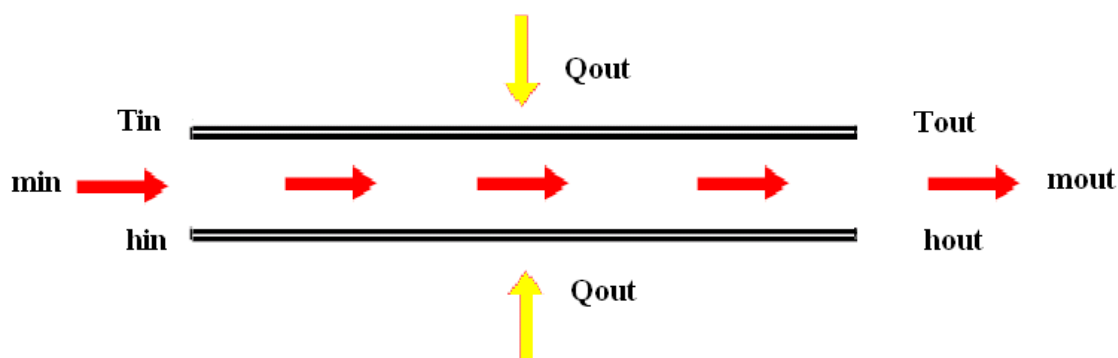
2.6 Nevýhody

Nevýhodou programu Dymola je, že je na rozdíl od standardní knihovny Modelica komerčním výrobkem. Volně dostupná je pouze demoverze na stránkách Dynasim AB [7]. Tato demoverze, kterou jsem měl k dispozici je značně omezená. Například o velikost *Diagramu* pro skládání blokových schémat (není vhodná pro skládání velkých blokových schémat), v *Modelica Text* je povelen simulovat pouze jeden model (více modelů překladač nepřełoży), při přidání nové knihovny do knihovny Modelica (knihovnu vidíme, ale nemůžeme s knihovnou pracovat v prostředí simulace) a další.

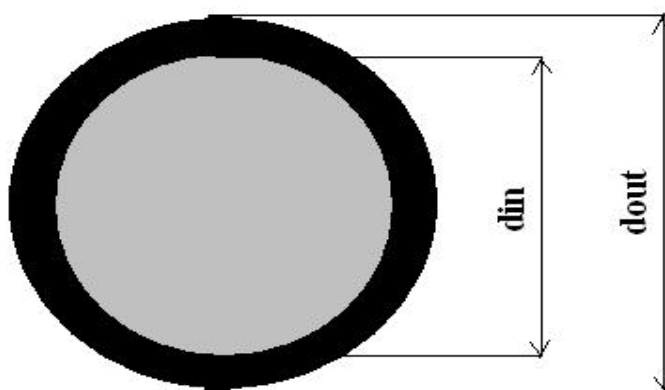
3 Simulace modelu přehříváku

Přehřívák je tepelný výměník využívající teplo spalin k opětovnému ohřátí páry z turbíny na pracovní teplotu. Pára přivedená z přehříváku nejprve expanduje v turbíně a pak je znovu odvedena do přehříváku k ohřátí na pracovní teplotu. Poté opět expanduje v turbíně. Zařazení přehříváku se projeví zvýšením termické účinnosti tepelného oběhu. Konstrukce přehříváku je v podstatě stejná jako konstrukce přehříváku. Pro jednoduchost volíme model jako jednu velkou trubku.

3.1 Seznámení s modelovou soustavou



Obr.3.1: Trubka přehříváku



Obr.3.2: Řez trubkou

Naše modelová soustava přehříváku má tyto parametry: délka trubky $l=2\text{ m}$, hmotnost železné trubky $m_{Fe}=283\text{ kg}$, vnitřní objem trubky $V=0,14\text{ m}^3$, vstupní entalpie $h_{in}=3,565 \cdot 10^6\text{ J/kg}$, teplo dodávané z okolí $Q_{out} = 70000\text{ W}$, vnitřní plocha trubky

$S_{in}=1,9 \text{ m}^2$, měrná tepelná kapacita $c_{Fe}=449 \text{ J/kgK}$, propustnost tepla $\alpha_I=900 \text{ W/m}^2\text{K}$, vstupní hmotnostní tok $m_{in}=2 \text{ kg/s}$ při konstantním tlaku $p=4 \text{ MPa}$. Vnitřní průměr $d_{in}=0,3 \text{ m}$, vnitřní průměr trubky $d_{out}=0,34 \text{ m}$.

3.2 Matematicko fyzikální popis

Matematicko fyzikální popis modelu je popsán třemi rovnicemi. Rovnice (3) je *Zákon zachování hmoty* (hmotnostní rovnováha) při průtoku páry trubkou přehříváku. Je popsán vstupním hmotnostním tokem m_{in} , který jsme pro zjednodušení modelu zvolili konstantní. Výstupním hmotnostním tokem z trubky přehříváku m_{out} a na hustotě $\rho(t)$, která se v závislosti na čase (zvyšování teploty páry) snižuje (viz Graf 3). Rovnice (4) a (5) vyplývají ze *Zákona zachování energie* (energetická rovnováha). V případě (4) se jedná o popis trubky, kde je změna teploty trubky T_{Fe} ovlivněna teplem proudících spalin Q_{out} (konstantní v modelu), teplem trubky Q_{Fe} a materiálem ze kterého je trubka vyrobena c_{Fe} a m_{Fe} . V našem modelu je trubka z železa. V případě (5) se jedná o popis páry, kde vstupující teplo páry je přehříváno teplem trubky přehříváku se změnou hustoty a akční veličiny.

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{d}{dt}(V\rho(t)) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{Fe} = \frac{d}{dt}(m_{Fe}c_{Fe}T_{Fe}(t)) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{Fe} + \dot{Q}_s^{in} - \dot{Q}_s^{out}(t) = \frac{d}{dt}(\rho(t) \cdot u(t) \cdot V) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{out} - \alpha_I S_{in} (T_{Fe}(t) - T_{out}(t)) = \frac{d}{dt}(m_{Fe}c_{Fe}T_{Fe}(t)) \quad (6)$$

Dosažením za vstupní a výstupní teplo (5), které se skládá z hmotnostního toku m a entalpie h vyplyne (6). Za teplo železné trubky Q_{Fe} v (4) a (5) je vyjádřena vztahem, který obsahuje vnitřní výhřevnou plochu trubky S_{in} , propustnost tepla α_I a teplotou trubky. Vyjádřeno v (6) a (7). V rovnici (7) je provedena substitucí za $u(t)$ (akční veličina) úprava pravé strany rovnice při , které vzniknou v rovnici dvě závislé proměnné na čase $h_{out}(t), \rho_{out}(t)$. Derivace $h_{out}(t), \rho_{out}(t)$ lze přepsat pomocí parciálních derivací výstupní teploty T_{out} .

$$\begin{aligned}
& \alpha_1 S_{in} (T_{Fe}(t) - T_{out}(t)) + \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out}(t) h_{out}(t) = \frac{d}{dt} (\rho(t) \cdot u(t) \cdot V) = \\
& = \left[u(t) = h(t) - \frac{p}{\rho(t)} \right] = \frac{d}{dt} (\rho(t) \cdot h(t) \cdot V - p \cdot V) = \\
& = V \left(\rho(t) \frac{dh(t)}{dt} + h(t) \frac{d\rho(t)}{dt} \right) = V \left(\rho_{out}(t) \frac{\partial h(T_{out})}{\partial T_{out}} \frac{dT_{out}}{dt} + h_{out}(t) \frac{\partial \rho(T_{out})}{\partial T_{out}} \frac{dT_{out}}{dt} \right) = \\
& = V \frac{dT_{out}}{dt} \left(\rho_{out}(t) \frac{\partial h(T_{out})}{\partial T_{out}} + h_{out}(t) \frac{\partial \rho(T_{out})}{\partial T_{out}} \right)
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}(t) = V \frac{\partial \rho(T_{out})}{\partial T_{out}} \frac{dT_{out}}{dt} \tag{8}$$

V konečné podobě (10) energetické rovnováhy trubky se nacházejí dvě proměnné závislé na čase teplota trubky $T_{Fe}(t)$ a teplota výstupní páry $T_{out}(t)$. Ostatní veličiny v rovnici jsou konstantní. V části (11) energetické rovnováhy páry se nám nachází stejné dvě časově závislé proměnné teploty. Zbylé časově závislé proměnné (veličiny) $h_{out}(t), \rho_{out}(t)$ v části (11) rovnice převedeme na teplotní závislost $T_{out}(t)$. K převodu $h_{out}(t), \rho_{out}(t)$ využijeme programu Fluid Prop 2.3 (viz kapitola 3.3). K zjednodušení $\dot{m}_{out}(t)$ v (8) využijeme převodu hustoty $\rho_{out}(t)$ na teplotní závislost $T_{out}(t)$. Zjednodušení je zobrazeno v rovnici (15). Tyto převody nám zajistí, abychom v konečném tvaru měli pro simulaci dvě rovnice energetické rovnováhy o dvou závislých teplotách $T_{out}(t)$ a $T_{Fe}(t)$.

$$\dot{Q}_{out} - \alpha_1 S_{in} (T_{Fe}(t) - T_{out}(t)) = \frac{d}{dt} (m_{Fe} c_{Fe} T_{Fe}(t)) \tag{10}$$

$$\alpha_1 S_{in} (T_{Fe}(t) - T_{out}(t)) + \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out}(t) h_{out}(t) = V \frac{dT_{out}}{dt} \left(\rho_{out}(t) \frac{\partial h(T_{out})}{\partial T_{out}} + h_{out}(t) \frac{\partial \rho(T_{out})}{\partial T_{out}} \right) \tag{11}$$

3.3 Převedení a úprava rovnic pomocí programu FluidProp2.3

Fluid Prop umožňuje převod dvou různých termodynamických vlastností na třetí termodynamickou vlastnost. K tomuto převodu využívá určitou knihovnu a další součásti, které umožňují použití v různých programech například *Microsoft Visual C++*, *Microsoft Excel*, *Matlab* a jiné. V našem případě byl použit pro převod program *Matlab*, ve kterém budeme převádět :

- Tlak p (konstantní) a teplotu výstupní páry $T_{out}(t)$ na entalpii $h_{out}(T_{out})$
- Tlak p (konstantní) a teplotu výstupní páry $T_{out}(t)$ na výstupní hustotu $\rho_{out}(T_{out})$

3.3.1 Převod p a $T_{out}(t)$ na entalpii $h_{out}(T_{out}(t))$

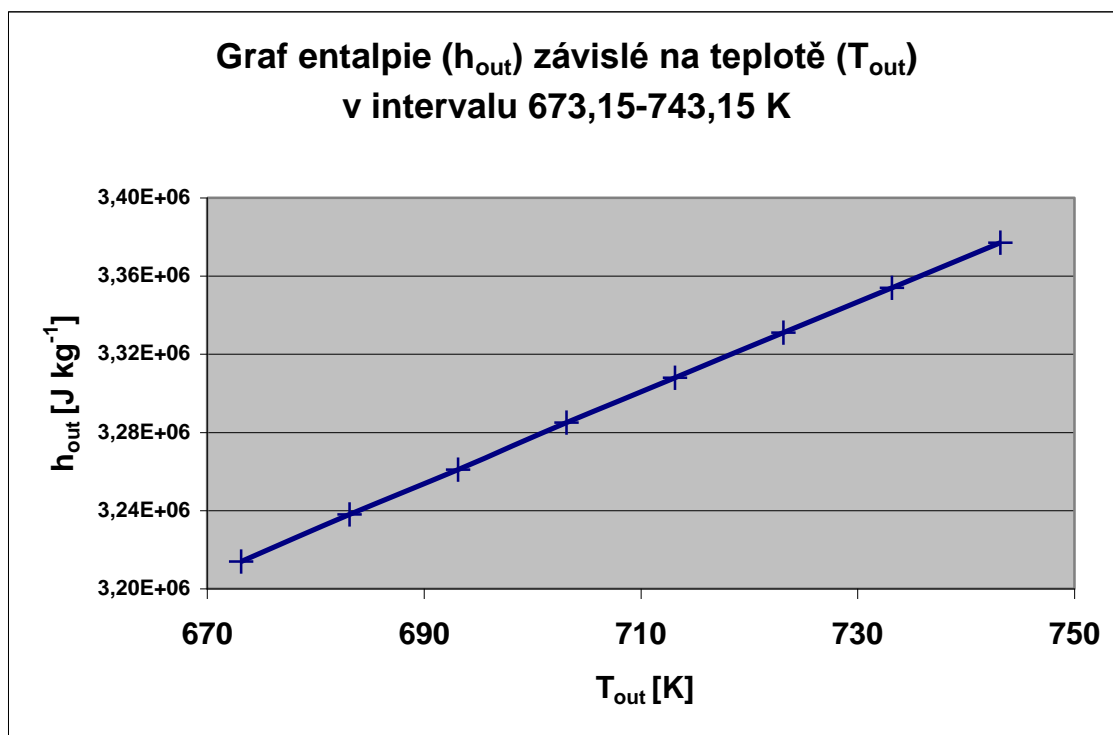
Po na instalování programu Fluid Prop2.3 ve složce *Sample clients - The MathWorks Matlab - Simulink sample* se nachází pomocný příklad a ukázka v *Matlabu*, která odpovídá tomuto převodu. Otevřeme ho a nastavíme konstantní tlak $p=4 \text{ MPa}$ (40 bar). Teplotu nastavujeme od $400 - 470 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a odečítáme entalpii ($h_{out}(T_{out})$). Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v Tab.1.

Tab.1: Entalpie a teplota

$T[^{\circ}\text{C}]$	$T[\text{K}]$	$h_{out}[\text{J/kg}]$
400	673,15	3214000
410	683,15	3238000
420	693,15	3261000
430	703,15	3285000
440	713,15	3308000
450	723,15	3331000
460	733,15	3354000
470	743,15	3377000

Odečtené hodnoty jsou znázorněny graficky pomocí Graf 2, kde jsme pomocí lineární regrese získali závislost (12) entalpie na změně teploty v rozsahu teploty ($400 - 470 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

$$h_{out}(T_{out}(t)) = 2321,2T_{out}(t) + 2 \cdot 10^6 \quad (12)$$



Graf 2: Entalpie a teplota

3.3.2 Převod p a T_{out} (t) na hustotu pout (T_{out} (t))

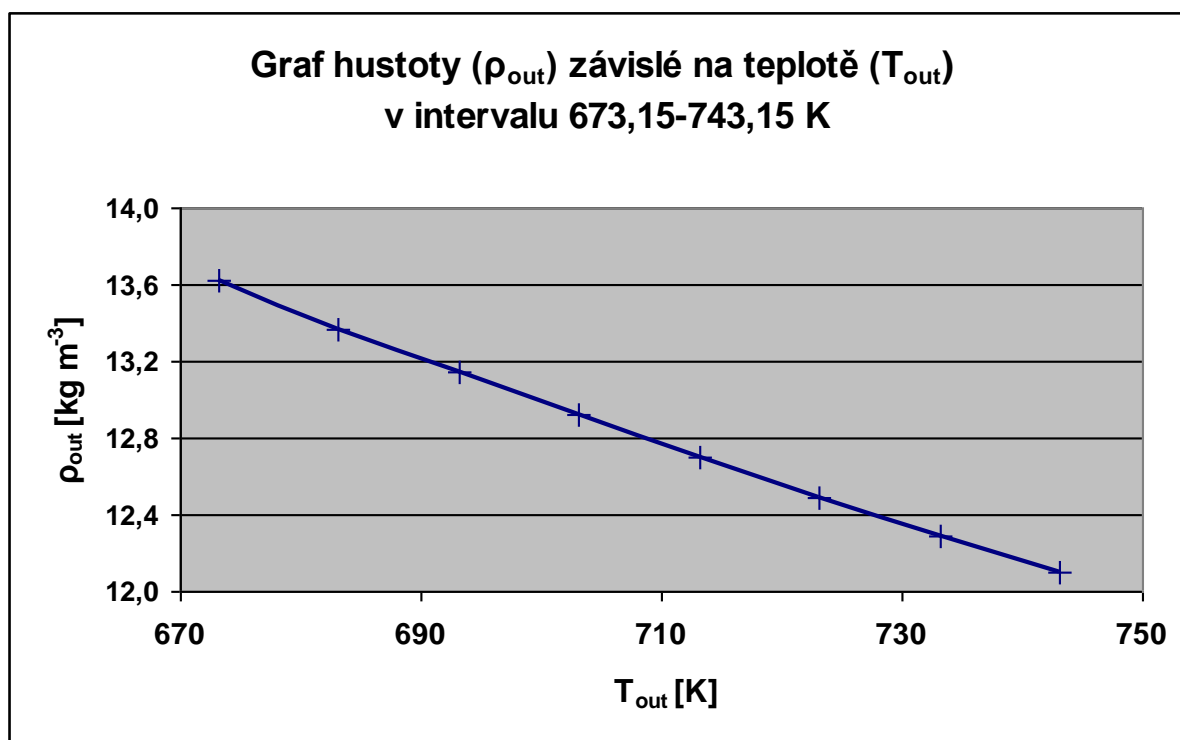
Tab.2: Hustota a teplota

T [°C]	T [K]	ρ [kg/m ³]
400,00	673,15	13,62
410,00	683,15	13,37
420,00	693,15	13,14
430,00	703,15	12,92
440,00	713,15	12,70
450,00	723,15	12,49
460,00	733,15	12,29
470,00	743,15	12,10

Podle pomocného příkladu na převod entalpie předěláme tento příklad převodu konstantního tlaku $p=4 \text{ MPa}$ (40 bar) a teploty (400 – 470 °C) na hustotu. Odečítáme hustotu ($\rho_{out}(T_{out})$), Tyto hodnoty jsou zobrazeny v Tab.2.

Odečtené hodnoty jsou znázorněny graficky pomocí Graf 3, kde jsme pomocí lineární regrese získali závislost (13) hustoty při změně teploty v rozsahu teploty (400 – 470 °C).

$$\rho_{out}(T_{out}(t)) = -0,0216T_{out}(t) + 28,138 \quad (13)$$



Graf 3: Hustota a teplota

3.4 Upravené rovnice pro simulaci

Z rovnice (10) si vyjádříme derivaci T_{Fe} (14), což je první rovnice pro simulaci. Pomocí rovnic (8) a (13) je upravena rovnice (15) kde jsme si vyjádřil výstupní hmotnostní tok $m_{out}(t)$, který dosadíme do rovnice (16). Zároveň s tím to dosadíme do (16) z rovnic (13) a (12) $h_{out}(T_{out})$ a $\rho_{out}(T_{out})$.

$$\frac{dT_{Fe}}{dt} = \frac{Q_{out} - \alpha_1 S_{in} (T_{Fe}(t) - T_{out}(t))}{m_{Fe} c_{Fe}} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{out}(t) = 0,0216V \frac{dT_{out}}{dt} + \dot{m}_{in} \quad (15)$$

$$\frac{dT_{out}}{dt} = \frac{\alpha_1 S_{in} (T_{Fe}(t) - T_{out}(t)) + \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out}(t) h_{out}(t)}{V(\rho_{out}(T_{out}(t)) * 2321,2 + h_{out}(T_{out}(t)) * (-0,0216))} \quad (16)$$

$$\frac{dT_{out}}{dt} = \frac{\alpha_1 S_{in} (T_{Fe}(t) - T_{out}(t)) + \dot{m}_{in} h_{in} - (0,0216V \frac{dT_{out}}{dt} + \dot{m}_{in}) * (2321,2T_{out}(t) + 2*10^6)}{V((-0,0216T_{out}(t) + 28,138) * 2321,2 + (2321,2T_{out}(t) + 2*10^6) * (-0,0216))} \quad (17)$$

Konečný tvar simulovaných rovnice (14) a (17), které zapíšeme do programu *Dymola* pomocí jazyku *Modelica* a provedeme simulaci soustavy (viz kapitola 3.5).

3.5 Simulace upraveného modelu přehříváku

3.5.1 Počáteční podmínky ($T_{out}=T_{Fe}$)

Jako počáteční podmínky zvolíme $T_{out}=T_{Fe} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C} = 673,15 \text{ K}$. Tyto počáteční podmínky volíme stejné, pro lepší vzájemné porovnání průběhů teplot páry a trubky přehříváku. Vytvoříme si nový model *Prihrivak* v programu *Dymola* (viz kapitola 2.5.1). Otevřeme okno *Modelica text* a vepíšeme do něj rovnice (14) a (17). Model přehříváku je simulován v režimu *Simulation*, kde byla nastavena doba simulace *stoptime=700 s* (viz kapitola 2.5.1). Výsledný průběh Graf 4, kde je znázorněná závislost změny teploty páry v čase (červená) na závislosti teploty trubky v čase (modrá). Znázorňuje vnější zahřátí trubky přehříváku okolním teplem (v našem modelu konstantním teplem pro zjednodušení modelu) v kotli, kterým se mění teplota T_{Fe} . Tato změna teploty trubky T_{Fe} ovlivňuje teplotu páry T_{out} (červená), která prochází trubkou přehříváku.

model prihrivak

```
parameter Real m=283;
parameter Real hin=3565400;
parameter Real V=0.14;
```

```

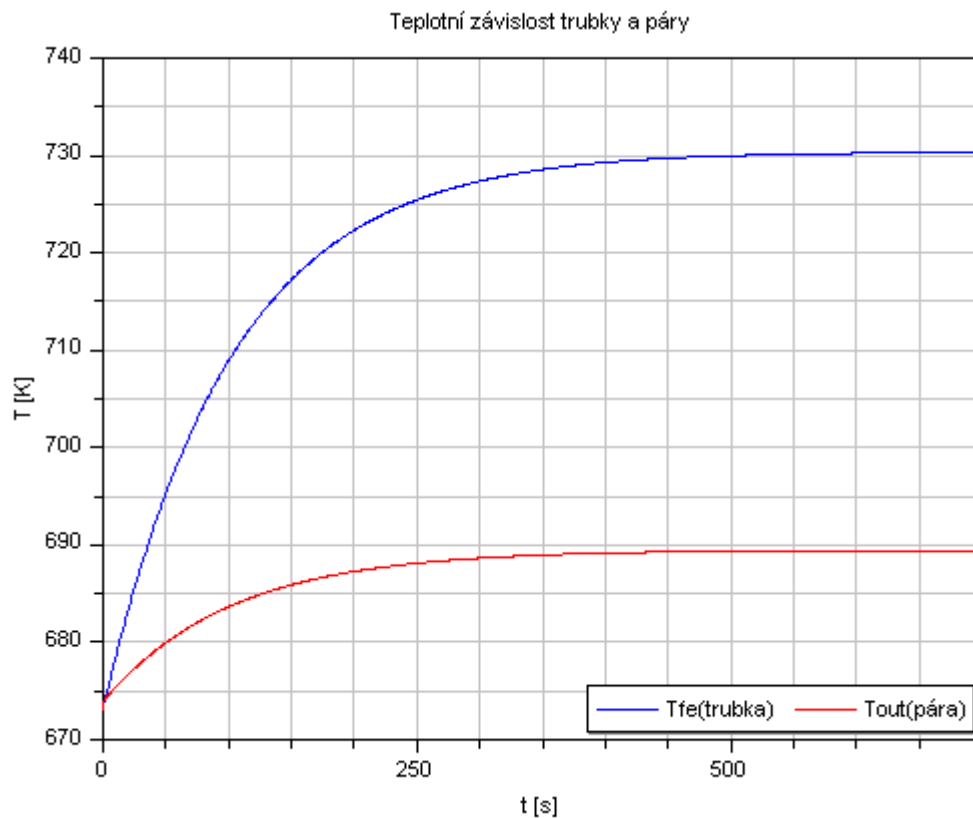
parameter Real min=2;
parameter Real cfe=449;
parameter Real alfa=900;
parameter Real Si=1.9;
parameter Real Q=70000;

Real Tf(start=673.15);  teplota trubky TFe
Real To(start=673.15);  teplota páry Tout

equation
der(Tf)=(Q-(alfa*Si*Tf)+(alfa*Si*To))/(m*cfe);
der(To)=((alfa*Si*Tf)-(alfa*Si*To)+(min*hin)-
(V*der(To)*0.0216+min)*(2321.2*To+2000000)))/(V*((-
0.0216*To+28.138)*2321.2+(2321.2*To+2000000)*(-0.0216)));

end prihrivak;

```

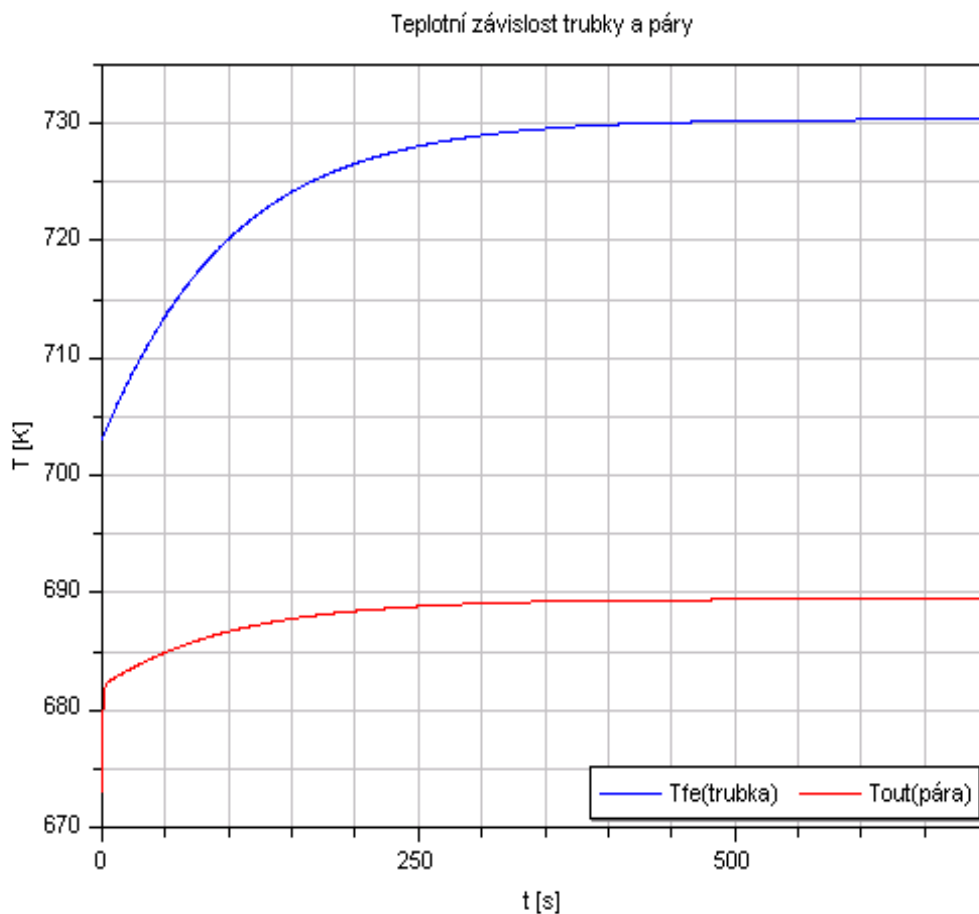


Graf 4: Teplota trubky a páry se stejnými počátečními podmínkami

3.5.2 Počáteční podmínky ($T_{out} < T_{Fe}$)

Jako počáteční podmínky zvolíme $T_{out}=400\text{ °C} = 673,15\text{ K}$ a $T_{Fe}=430\text{ °C} = 703,15\text{ K}$. V této části simulace modelu volíme počáteční teplotu trubky T_{Fe} větší z toho

důvodu, abychom zjistili dopad zvýšení teploty trubky přehříváku T_{Fe} na teplotě páry T_{out} . V předchozím *model Prihrivak* (viz kapitola 3.5.1) přepíšeme počáteční podmínky teploty trubky (`Real Tf(start=703.15);`), tím nastavíme změnu počáteční podmínky v okně *Modelica text*. Model přehříváku je simulován v režimu *Simulation*, kde byla nastavena doba simulace *stoptime=700 s*. Výsledný průběhů Graf 5, kde je znázorněná závislost změny teploty páry v čase (červená) na závislosti teploty trubky v čase (modrá). Má oproti Graf 4 rychlejší a strmější náběh průběhu teploty páry, které jsou zapříčiněny, zvětšením počátečních podmínek teploty trubky oproti Graf 4, která hned od začátku simulace dodává procházející páře větší teplo. Čím větší počáteční podmínka teploty trubky přehříváku, tím rychlejší bude náběh teploty páry.



Graf 5: Teplota trubky a páry se počátečními podmínkami $T_{Fe} > T_{out}$

Závěr

Téma bakalářské práce bylo zvoleno na základě současně používaných typů kotlů v energetice v uhelných elektrárnách. Tyto typy kotlů byly v této práci popsány a byli jsme seznámeni s jejich základními parametry, ze kterých vyplynuly některé přednosti i nedostatky. Dále nás tato práce stručně seznámila s druhy regulace parních kotlů, které byly popsány u jednotlivých typů kotlů. Vzájemně jsme tyto typy kotlů mezi sebou porovnali a uvedli, na který typ kotle se do budoucna soustředí světová výroba energie (průtočný nadkritický kotel).

V další části jsme se seznámili s architekturou, dovednostmi, přednostmi a základními nástroji simulačního prostředí programu Dymola. Za pomoci těchto prvků jsme využili základních blokových prvků knihovny Modelica a sestavili s popisem postup pro simulaci modelu na jednoduchém příkladu sedačky. Tato simulace byla provedena a popsána pomocí jazyka Modelica, ve kterém stačí správným a jednoduchým způsobem nadefinovat konstantní parametry a vypsát rovnice z matematicko-fyzikálního popisu modelové soustavy. Uvedený způsob je velmi efektivní a rychlejší než skládání bloků z knihovny Modelica. K dispozici byla pouze omezená demoverze. Myslím si, že plná verze tohoto programu umí nabídnout v odvětví simulace spoustu zajímavých věcí, které bych rád v budoucnu vyzkoušel.

Hlavním úkolem bylo vybrat model části parního kotle (přehřívák páry), který byl simulován v simulačním prostředí programu Dymola, ve kterém byly ověřeny základní znalosti simulačního prostředí programu pro simulaci složitějších modelových soustav. Tento model jsme nejprve popsali a navrhli pro něj vhodné parametry. Pro zjednodušení matematicko-fyzikálního popisu o parciální derivace bylo využito programu FluidProp, který nás seznámil s převodem dvou termodynamických veličin na třetí veličinu. Upravená a zjednodušená rovnice byla simulovaná pomocí jazyka Modelica.

Literatura

- [1] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. Miloslav Vlk. 1. vyd. Praha : SNTL, 1984. 608 s. ISBN 04-247-84.
- [2] *Skupina ČEZ* [online]. c2008 [cit. 2008-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi/uhelne-elektrarny.html>>.
- [3] *PROVOZ ELEKTRÁRNY* [online]. 2004 [cit. 2008-03-05]. Dostupný z WWW: <http://sweb.cz/oklzed/sos/el_tepelna.htm>.
- [4] FARKAŠOVÁ, Blanka, KRČÁL, Martin. *Projekt Bibliografické citace* [online]. 2004-2008 [cit. 2008-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.citace.com/>>.
- [5] *MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ : Ministry of the environment of the Czech Republic* [online]. 2005 [cit. 2008-04-05]. Dostupný z WWW: <[http://www.env.cz/www/ippc.nsf/\\$pid/MZPXXFBQXAJ5](http://www.env.cz/www/ippc.nsf/$pid/MZPXXFBQXAJ5)>.
- [6] Řízení nadkritických systémů : Technologie pro kotle s nadkritickým tlakem zvyšují výkonnost uhelných elektráren, vyžadují však specializované strategie řízení. *CONTROL ENGINEERING* [online]. 2007 [cit. 2008-03-06], s. 1-4. Dostupný z WWW: <http://www.emersonprocess-powerwater.com/news/ae/PR_CE_SupercriticalControl_Czech.pdf>.
- [7] *Dymola : Dynamic modeling laboratory (Dynasim AB)* [online]. c2004-2008 [cit. 2008-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.dynasim.com/index.htm>>.
- [8] *Modelica and the Modelica Association* [online]. [1996] [cit. 2007-11-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.modelica.org/>>.
- [9] *Vodní a tepelné elektrárny* [online]. [2000-2006] [cit. 2007-11-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/princip-tepelne-elektrarny.htm>>.